

積雪重量計を用いた融雪観測について

(独) 土木研究所 寒地土木研究所 水環境保全チーム○鳥谷部 寿 人
 山下 彰 司
 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 道央支所 菊 地 渉

融雪水は寒冷地域においては重要な水資源である。しかしながら、春季の暖気や雨の影響で災害を引き起こすこともある。したがって、積雪相当水量の正確な評価や融雪流出量の予測は河川管理には大変重要なものである。本研究においては、定山溪ダム流域において積雪密度の時間変化を調査している。ここでは積雪重量計とライシメータを用いて積雪重量変化と融雪流出量の観測を行っており、この調査データを用いて積雪相当水量について評価を行った。

キーワード：冬期水文観測、積雪重量計、ライシメータ、積雪相当水量

1. まえがき

積雪寒冷地域では雪は時として交通障害などを引き起こし我々の生活を脅かしたりするが、その反面水資源供給の面では重要な役割を担っている。すなわち、雪は雨と異なり、降った後もすぐには流出せず、冬期間山岳部などにいったん蓄積された後、春の気温上昇に伴って融解して流出してくることから、降水量の変動を相殺し安定した水の供給源となり得る。図-1 は札幌の 1954 年から 2008 年までの 55 年間のアメダスデータ¹⁾から年降水量と年降雪量の値を示したものである。なお、降雪量は雪の密度を $0.1g/cm^3$ として水当量に換算している。ここで年降水量の平均値は約 1100mm、降雪量の平均値は約 490mm であり、降水量の約 4 割は降雪量が占めている。また、降雨量についてみると 1975 年 (昭和 50 年) や 1981 年 (昭和 56 年) などの洪水のあった年は 1000mm を超えているが、1984 年 (昭和 59 年) のように 200mm 程度と少ない年もある。

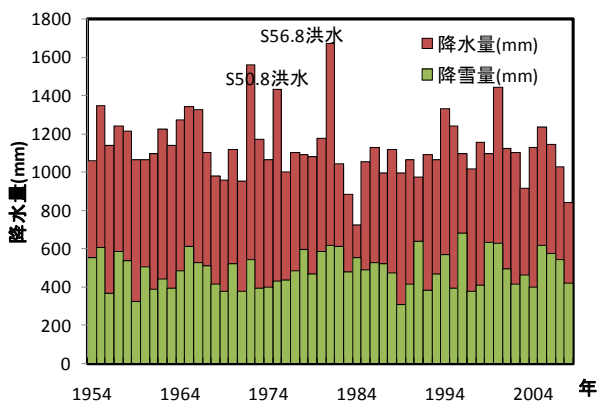


図-1 札幌の年降水量と年降雪量

一方降雪量は 300mm から 600mm の間で比較的安定的に推移している。

このように長期的にみると安定した水の供給源ともいえるが、一方で融雪時に降雨が伴うと出水被害を引き起こす要因ともなる。積雪寒冷地域のダムでは融雪期は非出水期であり、春から夏にかけての利水容量を確保するために融雪水を貯留し水位を高く保つ時期であるため、こうした時のダム管理は高いリスクを伴うこととなる。

また近年話題となっている地球温暖化について IPCC の第 4 次評価報告書によると今後 100 年間の温室効果ガス排出シナリオ及び地上気温の予測では少なくとも数十年は地上気温は上昇し続ける可能性が高いと予測されている。また気象庁が発表した地球温暖化予測情報第 6 号には最も CO_2 の排出量が大きくなる IPCC の A2 シナリオ (経済活動を重視) を用いた地球気候モデルによる 100 年後の気温と降雪の予測結果が報告されている。この中で国内の平均気温は $2^{\circ}C$ から $3^{\circ}C$ 上昇するとされ、高緯度地域で特に大きな上昇傾向にあり、夏季と比べ冬季の気温上昇が大きいと報告されている。またこうした影響を受けて年降雪量は特に日本海側で顕著に減少するとされており、多いところでは 300mm から 400mm 減少するとされている。一方、年降水量は特に北日本で増加するとされている。

こうした状況を踏まえ、水の循環過程において重要な役割を果たす雪に関して、積雪からその流出に至る水収支が的確に評価できれば今後の水資源管理および防災計画に寄与するところも大きいと考える。

以下にこれまでの積雪および融雪についての知見を述べると共に、定山溪ダム流域で行なった積雪重量計を用いた融雪観測について記述する。

2. これまでの積雪および融雪についての知見

流域全体の積雪量を把握することは、その後の水収支を定量化するための重要な作業である。代表的な方法について以下に示す。

最も一般的で古くから行われているのは直接現地で積雪量を計測するスノーサーベイによる方法である。アメリカでは 1900 年代初頭から行われており、日本では 1948 年に北海道庁²⁾が石狩川水系忠別川で最初の調査を行っている。その後、水力発電による電源開発に伴って積雪地域で盛んに行われるようになった。北海道開発局³⁾においても多目的ダムの建設に伴い、1974 年、1975 年に石狩川水系芦別川および幾春別川で調査が行われ、積雪相当水量と地形要因の関係をメッシュ情報に整理し、流域積雪相当水量を算定している。1978 年に北海道大学低温科学研究所⁵⁾でも大雪山旭岳や手稲山などで調査が行われ気象要因との関係について整理されている。山田ら⁵⁾によると積雪相当水量は高度とともに増加することが示されており、この知見は今日の積雪相当水量を推定するうえでも用いられている。また、積雪相当水量の時間的な動向をみると、融雪が進むと積雪相当水量の高度差がますます助長されその傾きが急になっていることが示されており、全山融雪状態となると融雪量が高度によらず一定となり、積雪相当水量分布の傾きも一定となることも示されている。さらに森林限界を境に積雪相当水量の高度分布が異なることも示されている。

一方、山岳地帯で広範囲のスノーサーベイを実施することは厳冬期の調査であり多大な労力を要し危険を伴うことから物理的に困難である。ゆえに得られるデータは限られている。そこでリモートセンシング技術を活用した調査手法も開発されてきた。航空機による測量技術の進展に伴い 1963 年の北陸豪雪を契機として航空写真を利用する方法が提案されている。丸安ら⁷⁾は黒部川流域において無雪時と最多雪時の航空写真から標高差を読み取り、積雪深を推定し最大積雪相当水量を求めている。近年、航空レーザ測量の進展に伴い岡本ら⁸⁾によると無雪時と積雪時の二時期のレーザ測量結果と現地の GPS 観測および超音波積雪深計で計測した結果との比較において高い精度の観測が可能であることが示されている。

1972 年にはアメリカが地球資源探査・環境監視を目的とした LANDSAT の打ち上げに成功し、人工衛星を活用した気象観測の時代が到来した。日本では 1981 年に高橋ら⁹⁾が只見川上流域において LANDSAT の画像データから融雪前後の雪線（無雪域と積雪域の境界）を求め、この違いから融雪面積を読み取り、気温データより推定した融雪量から積雪相当水量を算定している。

ところで LANDSAT のレーダの観測周波数は雲の影響を受けやすいという弱点があり、得られる情報としては積雪面積情報のみという課題がある。2006 年に打ち上げられた日本の陸域観測技術衛星 ALOS（だいち）には

雲や雨の影響を受けないマイクロ波を利用した PALSAR が搭載されており、今後の研究が期待されているところである。

次に融雪量の解析について以下に述べる。これについては様々な方法が提案されている。大別すると雪面上の全ての熱収支を扱う熱収支法と熱収支の中で最も取り扱い易い気温のみをファクターとした解析法である積算暖度法（デグリーデー法あるいはデグリーアワー法）があり、近藤ら¹⁰⁾によって紹介されている。

このように様々な手法が提案されており、今日の積雪融雪量の推定が可能となってきている。しかしながら本研究のように、積雪重量を時系列的に直接連続観測した例は少ない。本研究ではこれまでの積雪および融雪についての知見をもとに積雪重量の連続観測結果から積雪相当水量の評価を行った。

3. 現地観測

現地観測は代表的な積雪寒冷地の札幌市南部の石狩川流域の支川豊平川流域に位置する定山溪ダム観測露場（標高 400m）において実施した。図-2 に観測露場の観測機器の配置を示す。

観測項目は表-1 に示す各項目で、積雪重量計による積雪観測とともに、融雪量を計測するためライシメータ（2m×2m）による積雪底面流出量観測を行った。データ収集は平成 19 年 12 月から平成 20 年 4 月にかけて 1 時間毎に行った。積雪重量の計測に用いた積雪重量計は新潟

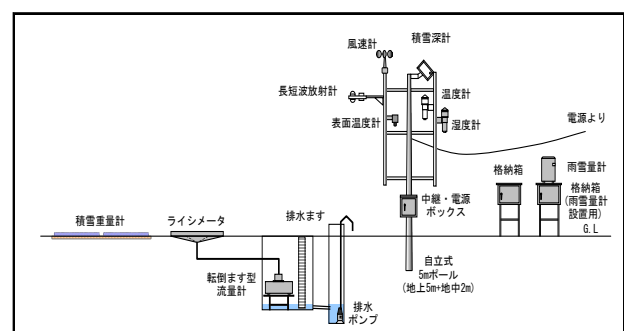


図-2 観測機器配置図

表-1 観測項目一覧

観測項目	計測器名	単位
融雪量	ライシメータ + 転倒ます型流量計	mm/hr
積雪重量	積雪重量計	kg/m ²
降水量	雨雪量計	mm/hr
積雪深	積雪深計	cm
気温	温度計	℃
湿度	湿度計	%
風速	風速計	m/s
下向き短波放射	長短波放射計	W/m ²
下向き長波放射		W/m ²
上向き短波放射		W/m ²
上向き長波放射		W/m ²
積雪表面温度	放射温度計	℃

電気(株)製 MN-301 であり、ステンレス製の薄板扁平容器 2 枚の中に不凍液を充填し、容器内圧力を圧力センサーで電氣的に計測するものであり、一枚あたり 1m×2m の大きさで、最大 2,500kg/m²まで計測できる。なお、この計器の計測誤差は±10kg/m²である。

4. 融雪状況のとりまとめ

(1) 2008 年春季観測

前章で述べた熱収支法により算出した積雪表面融雪量 Q と現地観測された降雨量及びライシメータによる積雪底面流出量の時系列変化の比較を図-3 に、積雪重量計の時間変化(下向き:減少、上向き:増加)と積雪表面融雪量 Q -降雪量(上向き:積雪表面融雪量>降雪量、下向き:積雪表面融雪量<降雪量)の比較を図-4 に示す(なお単位面積当り積雪重量の時間変化は、融雪量 mm/h に換算している)。定山溪ダム流域における 2008 年春季の融雪は観測を開始した 2005 年以降最も早く 3 月 8 日前後の気温上昇に伴い本格化している。融雪の初期から 4 月 7 日の間は積雪表面融雪との間に時間遅れが生じているものの、4 月 8 日から 4 月 15 日の消雪日までは、積雪表面融雪量と積雪底面流出量において良い一致が観測された。また、融雪開始直後や降雨が観測された 3 月 15 日前後には一時降雨+積雪表面融雪量を上回る底面流出量が観測されているが、積雪表面融雪量の 2 倍近い値を観測した過去 2 ヶ年のような極端な違いはない。

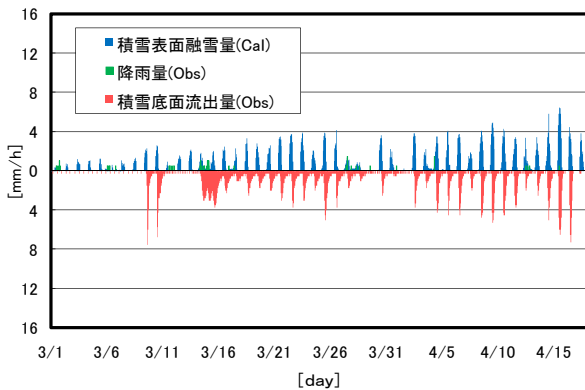


図-3 表面融雪量と底面流出量

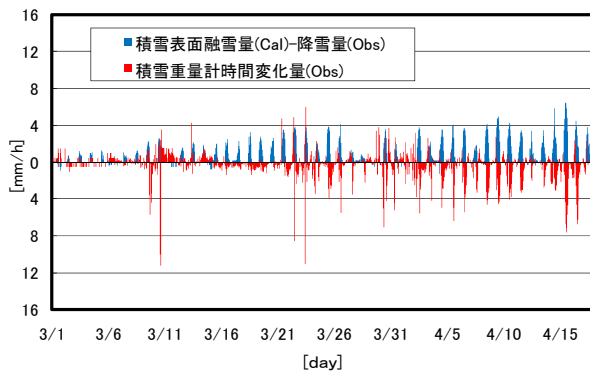


図-4 重量時間変化と表面融雪量-降雪量

表-2 積雪断面観測結果(3月6日)

定山溪ダム		03/06/08	雪質分類		粒度
高さ (cm)	雪温 (°C)	密度 (g/cm ³)	厚さ (cm)	雪質	
136	-0.2	0.10	2	新雪	2mm
130	-0.2	0.09	5	しまり	2mm
120	-1.8	0.17	5	しまり	2mm
110	-3.2	0.20		氷板形成中	
100	-3.6	0.17	33	しまり	1mm
90	-3.4	0.26			
80	-3.1	0.26	8	しまり	1mm
70	-2.6	0.32	17	氷板形成中	
60	-2.2	0.33		しまり	1mm
50	-1.8	0.37			
40	-1.4	0.35	45	しまり	1mm
30	-1.2	0.36			
20	-0.9	0.36		ざらめ	2.4mm
10	-0.5	0.30	7	氷板形成中	
0	-0.2	0.32	14	ざらめ	2.4mm

表-2 に融雪期直前の 3 月 6 日に実施した積雪断面観測の結果を示す。これを見るとこの時点で多層の氷板が形成され始めているが、4 月 15 日に実施した観測では積雪深が 20cm しかなく、全層ザラメ雪となっていた。また、3 月 15 日前後の降雨やその後の気温が上昇していることから、形成中の氷板が消失したためと思われる。

また 4 月 8 日以降、積雪表面融雪量と積雪底面流出量の関係において良い一致が観測されている。この日の最大積雪深は 39cm であり、積雪深が 52cm 以下になると貯留効果を考慮する必要がなくなったとする中津川ら¹¹⁾の報告を裏付ける結果となった。

(2) 2006 年~2008 年春季観測のとりまとめ

谷瀬ら¹²⁾によると積雪の中期には圧密によってほぼ同じ積雪深に対して、単位面積あたりの積雪重量が次第に増加していくことが報告されている。現地で観測された積雪重量と積雪深から算出した積雪密度と積雪深の関係を図-5 に示す。2006 年 1 月末と 2007 年 1 月始めにそれぞれ積雪深が 150cm を超えており、これ以降約 3 ヶ月間堆積と圧密を繰り返している。新目ら¹³⁾によれば積雪密度が 500kg/m³前後に到達後、密度を一定に保ちながら融雪によって積雪深が減少していくことが報告されている。一方、2008 年は 2 月末に一時的に 150cm 以上の積雪が観測されたものの 3 月半ばの気温の上昇とともに融雪が始まり一気に積雪深が減少している。この年の積雪重量最大時(492kg/m²)の密度は 450kg/m³で、500kg/m³まで到達していない。このため十分な圧密を受ける前に融け出したことが伺える。なお、図中 2006 年は 4 月 20 日の前で密度が大きく増加し、これ以降大きく減少しているが、この前後に時間雨量 5mm を超える降雨が観測されており、積雪が保水することによりみかけの密度が一時的に増加したことに起因しているものと思われる。

次に定山溪ダムの水文諸量を用いて 2006 年春から 2008 年春までの融雪期の水収支を整理した。ここで融雪期間中は融雪期のピーク流入量と減衰期の各時刻の流入

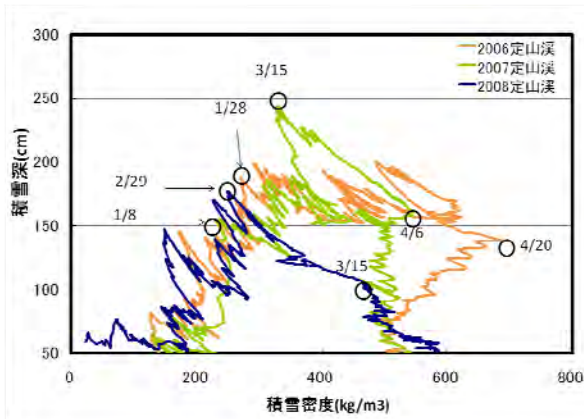


図-5 積雪深—積雪密度変化

表-3 融雪期の水収支

年月日 (西暦)	積雪相当水量a	降水量b	流入量c	流出率 c/(a+b)
2006/4/12-7/5	$1.0 \times 10^6 \text{ m}^3$	$1.0 \times 10^6 \text{ m}^3$	$1.0 \times 10^6 \text{ m}^3$	0.88
2007/4/8-6/27		105	17	108
2008/3/15-6/12	86	14	63	0.63

量の比を片対数グラフにプロットした通減曲線を基に算定した。表-3は定山溪ダムのスノーサーベイから求めた積雪相当水量と降水量に対する流入量の比から流出率を算出した結果である。蒸発散などの損失があるので実際にダムに流入する量は少ないが、2006年および2007年の流出率は共に8割を超えている。一方2008年の流出率は6割程度と算出された。2008年は過年度に比べ積雪量が少ないうえ、消雪日も融雪の最大の頃であったこれまでより2週間程早くなっている。近藤ら¹⁰⁾によると積雪の熱収支を考える上での支配的なパラメータであるアルベードの値は雪面では40から70%程度に対し、裸地(乾燥)では20から30%程度と示されており、融雪早期に消雪したことで、土壤中の水分の蒸発が進んだ可能性もある。さらに融雪初期からピークにかけて降水量がほとんど無かった。このような要因が流出率の減少に影響を及ぼしたと推察される。

5. 融雪量の推定

(1) 積算暖度による融雪量の推定

長期間の融雪を取り扱う場合の実用的なモデルとしては2章の積算暖度法がよく用いられる。

ここでは積雪重量計から得られたデータを使い、定山溪ダム観測露場における融雪量の推定を試みた。

単位面積当積雪重量最大日を起算日として時間単位の積算暖度(0°C以上の気温の積算値)を日単位に換算した値(以下、積算暖度) ΣT_d と起算日以降の日当り積雪深 H_s (以下、積雪深) の関係を図-6に示す。図より年ごとに積雪深の違いはみられるものの、積算暖度と積雪深が負の相関関係にあることがわかっている。この関係を考

表-4 重回帰係数一覧

α	β	γ	r^2
-0.06	0.99	-1.73	0.99

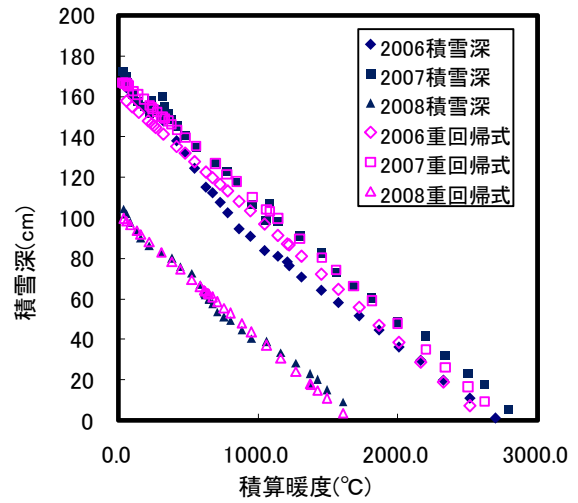


図-6 積雪深と積算暖度の関係

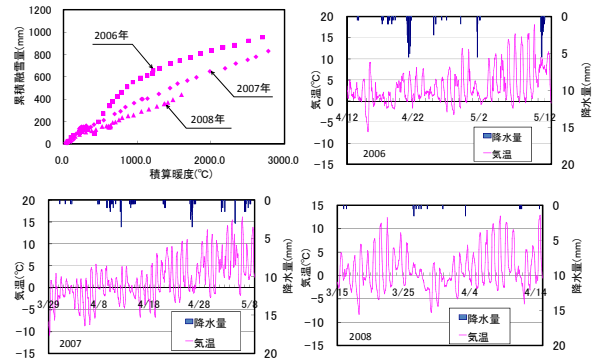


図-7 積算暖度と累積融雪量の関係並びに気温と降水量の関係

慮し、各年の積算暖度 ΣT_d と起算日における積雪深(以下、最大積雪深) H_{high} をパラメータにとり、次の重回帰式を仮定し、 α 、 β 、 γ の最適化を行った。表-4に重回帰係数一覧、図-6に推定値を示す。

$$H_s = \alpha \sum T_d + \beta H_{high} + \gamma \quad (1)$$

単位面積当たりの積雪重量は積雪相当水量に換算できるのでこの最大値をもって年最大積雪相当水量と見なすことができる。故にこの時の積算暖度と積雪重量差から求まる累積融雪量 R の関係に着目し解析を行った。

図-7に積算暖度と累積融雪量の関係並びに気温と降水量の関係を示す。図より各年の傾向にはばらつきがみられる。日野ら¹⁴⁾はこの要因として融雪水の一部は積雪層に浸透して再び凍結し積雪層の密度が変化するためとしている。そこで各年の融雪期の気温と降水量についてみると、2008年は融雪が始まってから10日目くらいに寒波があり、一方2006年は10日目くらいに降雨が観測されている。また各年共通して20日目以降気温上昇が見られる。このように年ごとにばらつきはみられるも

の図-6 に示したような積雪深と積算暖度の関係から、累積融雪量 R について積算暖度 ΣT_d と最大積雪深 H_{high} を説明変数とした次の重回帰式を仮定し、 a 、 b 、 c を最適

$$R = a \Sigma T_d + b H_{high} + c \quad (2)$$

化した。表-5 に重回帰係数一覧、図-8 に現地観測結果から算出した累計融雪量 R と重回帰式から推定された累積融雪量 R^* を示す。

ここで図-6 より $H_s=0$ の時の積算暖度 ΣT_d について式(1)を使用して解くと式(3)となる。

$$\Sigma T_d^* = \frac{\beta}{\alpha} H_{high} + \frac{\gamma}{\alpha} \quad (3)$$

表-5 重回帰係数一覧

a	b	c	r^2
0.33	1.43	-182.04	0.90

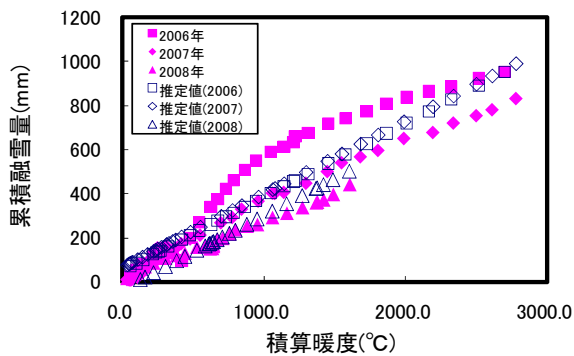


図-8 重回帰式による推定累積融雪量

表-6 累積融雪量推定結果 (定山溪ダム観測露場: 標高 400m)

	2006	2007	2008
H_{high} (cm)	164.2	172.6	104.5
ΣT_d (°C)	2697.5	2781.6	1604.8
ΣR (mm)	952	830	440
ΣT_d^* (°C)	2637.4	2773.8	1668.2
ΣR^* (mm)	930	988	523
$\Sigma R^* - \Sigma R$ (mm)	-22	158	83
$ (\Sigma R^* - \Sigma R) / \Sigma R $	0.02	0.19	0.19

これを式(2)に代入し、累積融雪量を推定した結果を表-6 に示す。ここで ΣT_d^* は $H_s=0$ となる推定日積算暖度、 ΣR^* はこのときの定山溪ダム観測露場地点における推定累積融雪量を示す。

(2) 積雪相当水量の推定

積雪相当水量の推定は、流域内の高度の異なる地点を直接調査し、積雪深、積雪重量を計測するスノーサーベイによって行われているが、2月から3月にかけての厳冬期の調査であり、多大な労力を必要とすることや安全面から、得られるデータは限られている。

そこで融雪期の現地観測を時系列的に連続観測した結果を用いて定山溪ダム流域の積雪相当水量の推定を試み

た。積雪相当水量の推定を困難にしているものは、積雪密度の推定と積雪深の空間分布推定にあるが、積雪深の空間分布推定については、工藤ら¹⁵⁾による当該流域での高度差による積雪深増加率を用いる方法や高度比による回帰式を用いる方法などが考えられる。ここでは積雪深分布について、工藤ら¹⁵⁾による高度差 100m 当たりの積雪深増加率 0.25 を用いた。

次に積雪密度の推定であるが、スノーサーベイによる各年の任意の標高 (530m) における積雪密度を基準とした各地点標高と密度比の関係を図-9 に示す。山田ら⁵⁾によると全山融雪状態となると融雪量が高度によらず一定となり、積雪相当水量分布の傾きも一定となることが指摘されている。スノーサーベイは融雪が始まる直前をねらって行われるため、この状況に近いといえる。図より、融雪期の積雪密度は高度に関係なくほぼ均一な値となることがわかる。このことから融雪期の積雪密度は空間的に変化しないという仮定のもと積雪相当水量を求めてみる。すなわち工藤ら¹⁵⁾の積雪深増加率を用いてメッシュ毎の H_{high} を求め、これを式(3)に代入しメッシュ毎の ΣT_d^* を求め、さらに式(2)に代入して推定累積融雪量 R^* を求める。なお、ここでいう推定累積融雪量は積雪相当水量を意味する。また定山溪ダム流域内の高度分布を知る必要があるが、石狩川流域ランドスケープ情報¹⁶⁾のメッシュ値 (約 1km×1km) を用いた。高度ごとの気温減率は 0.6°C/100m で補正した。積雪重量最大日の推定積雪相当水量とスノーサーベイによる値との比較を図-10 に示す。

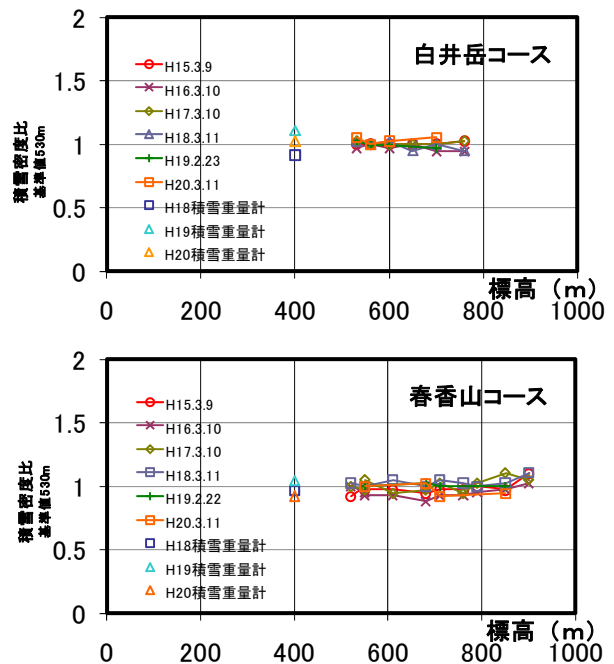


図-9 積雪密度の高度分布一定山溪ダム流域—

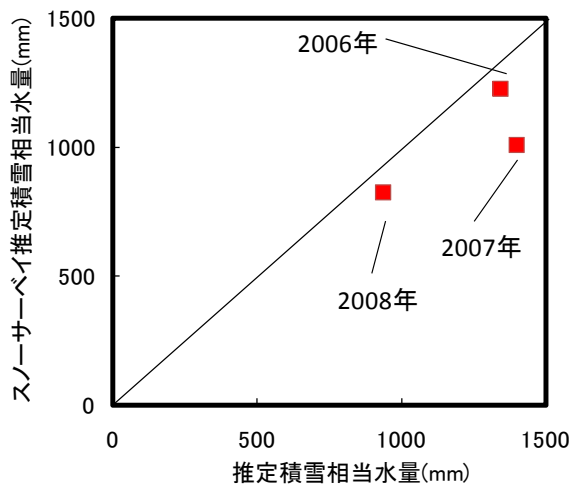


図-10 積雪相当水量の推定結果

6. あとがき

北海道の降水量の約半分は降雪によるものであり、このため当該地域の河川では春先には融雪出水が生じることとなり、ダムではこの融雪出水を調節しかつ有効利用することで水運用を図っている。ダムの運用を考えた場合、積雪相当水量を的確に把握することは重要な課題となる。冬季水文に関する研究はこれまで数多く行われてきているが、本研究のように、積雪重量を時系列的に直接連続観測した例は少ない。今回スノーサーベイの結果を基に各年の任意の標高を基準とした積雪密度比を求めたところ、融雪期の積雪密度は高度によらずほぼ均一な値となることを確認した。さらに単位面積当積雪重量が最大となる日以降の積算暖度と積雪深の関係より重回帰式を用いて積雪相当水量を推定した。積雪重量最大日における推定値はスノーサーベイによる値との比較において大きな値を示す結果となっているが、3ヶ年のデータのみでの推定結果であり、推定値には2割程度の誤差を含む。また、積雪相当水量を求めるときに積雪深の空間分布を標高に比例して増加するものとして扱ったが、岡本ら⁸⁾の航空レーザ測量に基づく調査によると標高の増大による積雪深の明瞭な増加は認められなかったとの事例もあることから、今後の課題としたい。2008年春季は札幌のアメダスにおいて、平年より12日早い消雪を記録している。こうしたことから2008年春季の観測結果を過去2年と比較すると、異なる傾向を示している。IPCCの第4次評価報告書によると、地球温暖化は今後も進行し、その影響は避けることはできないといわれており、2008年春季にみられたこうした傾向が将来的にどのようなようになるかをデータの蓄積を行い評価していく必要がある。

謝辞：本論文をまとめるにあたり、北海道開発局石狩川開発建設部豊平川ダム統合管理事務所から観測場所の提

供を受けるなど多大な協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省気象庁ホームページ：
<http://www.data.jma.go.jp>, 2008.
- 2) 菅谷：大雪山積雪水量及び流出調査、経済安定本部資源委員会・北海道庁土木部報告書、1949.
- 3) 長谷川茂、小林伸行：桂沢ダム流域の融雪流出の予知、北海道開発局土木試験所月報、pp.6-1~6-41、1974.
- 4) 山口甲、長谷川茂：融雪流出の予知に関する研究、北海道開発局土木試験所報告、64、1975.
- 5) 山田知充、西村寛、水津重雄、若浜五郎：大雪山旭岳西斜面における積雪の分布と堆積・融雪過程、低温科学、物理篇、37、pp1-12、1978.
- 6) 水津重雄、山田知充、若浜五郎：手稲山における積雪の堆積と雪質の変化、低温科学、物理篇、37、pp47-54、1978.
- 7) 丸安隆和、内田正人、田浦秀春：航空写真による積雪分布および積雪量の解析方法に関する研究、土木学会論文集、153、pp41-54、1968.
- 8) 岡本隆、黒川潮、松浦純生、浅野志穂、松山康治：山地の積雪深分布計測における航空レーザスキャナの適用性に関する検討、水文・水資源学会誌、第17巻5号、pp529-535、2004.
- 9) 武田要、高橋裕：LANDSAT 雪線情報と積算暖度法による流域最大積雪水量算定に関する研究、土木学会論文集、311、pp81-92、1981.
- 10) 近藤純正編書：水環境の気象学、朝倉書店、1994.
- 11) 中津川誠、工藤啓介、星清：積雪貯留を考慮した汎用的な融雪流出解析、水工学論文集、第48巻、pp37-42、2004.
- 12) 谷瀬敦、山下彰司：積雪重量計を用いた積雪層の観測について、水工学論文集、第51号、pp355-360、2007.
- 13) 新目竜一、山下彰司：積雪重量計を用いた冬季水文観測について、水工学論文集、第52巻、pp493-498、2008.
- 14) 日野幹雄、長谷部正彦、野田賢治：融雪時の河川の流出機構の研究、水工学論文集、第27巻、pp355-358、1983.
- 15) 工藤啓介、中津川誠：石狩川流域の水文メッシュ値の推定、土木学会59回年次学術講演会、pp151-152、2004.
- 16) (財)北海道河川防災研究センター編集・発行：石狩川流域ランドスケープ情報、CD-ROM、1998.